

# اندازه‌گیری تراوایی با استفاده از توموگرافی پرتو ایکس پزشکی در یکی از میادین جنوب باختر ایران

فاطمه هرمزاده قلاتی<sup>۱</sup>، مجید بنی‌اسدی<sup>۲</sup>، فریدون سبحانی<sup>۳</sup>، حسین ایزدی<sup>۱</sup> و حسین معماریان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> استاد، گروه مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۰۷

## چکیده

تراوایی یکی از مهم‌ترین خواص محیط متخلخل و بیانگر توانایی سازند در عبور دادن سیالات و همچنین کنترل‌کننده حرکت‌های جهت‌دار و دبی جریان سیالات در مخزن است. روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای اندازه‌گیری مقدار تراوایی وجود دارد که یک اندازه‌گیری دقیق در آزمایشگاه، مستلزم صرف وقت و هزینه است. امروزه با توجه به توسعه روش‌های تصویربرداری و پیشرفت کامپیوترها، شاخه جدیدی در فیزیک سنگ بر مبنای مطالعه رقومی سنگ‌ها به وجود آمده است که فیزیک سنگ رقومی نام دارد. در این روش، با تصویربرداری از ساختمان داخلی سنگ‌ها می‌توان ویژگی‌هایی چون تخلخل و تراوایی را اندازه‌گیری کرد. در این مقاله از ۱۰ پلاگ سنگی تهیه شده از یکی از مخازن کربناته مزوزویک جنوب غربی ایران تصاویر توموگرافی پرتو ایکس پزشکی با تفکیک‌پذیری ۲۰۰ میکرومتر تهیه شد. با ساخت حجم نماینده یا Representative Volume Element (RVE)، مدل سه‌بعدی فضای خالی نمونه‌ها از روی تصاویر دوبعدی حاصل شد. در نهایت با کدنویسی تحت MATLAB به منظور شبکه‌بندی RVE‌های به دست آمده، جریان سیال در آنها شبیه‌سازی شد و مقدار تراوایی برای هر کدام به دست آمد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، مقادیر تراوایی محاسبه شده برای این پلاگ‌ها نشان‌دهنده یک روند با مقادیر گزارش شده توسط آزمایشگاه با میزان همبستگی ۹۰٪ است. با استفاده از روش پیشنهادی و روند به دست آمده، می‌توان تراوایی نمونه‌های سنگی همان‌چاه که هنوز مورد آزمایش قرار نگرفته‌اند را با سرعت بیشتر و هزینه کمتر به دست آورد.

**کلیدواژه‌ها:** تراوایی، فیزیک سنگ رقومی، جریان سیال، توموگرافی پرتو ایکس، هندسه فضای خالی.

\* نویسنده مسئول: مجید بنی‌اسدی

E-mail: m.baniassadi@ut.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

دوبعدی آنیزوتروپ خاک استفاده کردند. Wang et al. (2003) از روش‌های المان محدود برای حل جریان سیال در محیط متخلخل استفاده کردند. آنها برای مدل کردن محیط متخلخل، تئوری هموژنیزه کردن را به کار بردند. آنها جریان سیال را در دو مقیاس میکرو و ماکرو بررسی کردند. (Piloti 2003) از روش بولتزمن شبکه‌ای برای حل معادلات ناویر-استوکس استفاده کردند. او نشان داد که روش بولتزمن شبکه‌ای، زمانی که توصیف جامعی از هیدرودینامیک جریان سیال با عدد رینولدز کم وجود داشته باشد، قادر به حل معادله ناویر-استوکس است. Zhang et al. (2014) به محاسبه تراوایی نمونه‌های ماسه‌سنگی کم‌تراوا از تصاویر میکرو-توموگرافی پرتو ایکس پرداختند. آنها همچنین تأثیر فشار مویینگی دینامیک در سازندهای کم‌تراوا را بر مقدار تراوایی بررسی کردند. (Ranut et al. 2015) روش دینامیک سیالات محاسباتی به شبیه‌سازی نمونه‌های آلومینیمی پرداختند و مقدار تراوایی و هدایت‌پذیری گرمایی را محاسبه و نتایج کار خود را با داده‌های تجربی موجود مقایسه کردند. ایزدی (۱۳۹۴) با استفاده از تصاویر توموگرافی پرتو ایکس پزشکی به محاسبه تخلخل پلاگ‌های سنگی پرداخت. همچنین با استفاده از دو تصویر دوبعدی، هندسه سه‌بعدی پلاگ‌ها و همچنین مسیرهای متصل‌کننده فضای متخلخل را با بزرگنمایی ۵ میکرومتر بازسازی کرد. با توجه به تاریخچه، تمامی مطالعات بر مبنای تصویری با تفکیک‌پذیری (Resolution) بالا (چند میکرومتر) بوده و تاکنون تحقیقی در راستای استفاده از توموگرافی پرتو ایکس پزشکی با تفکیک‌پذیری ۲۰۰ میکرومتر در اندازه‌گیری تراوایی صورت نگرفته است.

در این مقاله پلاگ‌های مورد بررسی با تفکیک‌پذیری ۲۰۰ میکرومتر تصویربرداری شدند. بعد از تهیه تصاویر توموگرافی پرتو ایکس، ابتدا با اعمال مقادیر حد آستانه، تصاویر به دو فاز فضای متخلخل و ماتریکس سنگ جداسازی شدند. پس از جداسازی تصاویر، هندسه سه‌بعدی فضای متخلخل ساخته شد. از آنجا که مدل‌سازی جریان سیال نیاز به

تراوایی یا نفوذپذیری (Permeability)، به‌عنوان توان و ظرفیت سنگ در عبور سیال بیان می‌شود که به تخلخل مؤثر سنگ بستگی دارد. به‌منظور اندازه‌گیری تراوایی نمونه‌های مغزه روش‌های متفاوتی انجام می‌شود که از آن جمله می‌توان به روش‌های سیال آب و نفت و گاز هلیم اشاره کرد. در آزمایشگاه، مغزه تهیه شده تحت شرایط مخزن قرار می‌گیرد و تراوایی با استفاده از تزریق سیال به داخل نمونه و رابطه داری محاسبه می‌شود. از آنجا که استفاده از روش‌های متداول آزمایشگاهی به‌منظور تعیین دقیق و قابل اطمینان تراوایی مستلزم صرف هزینه و وقت است، امروزه با توسعه روش‌های تصویربرداری و استفاده از رایانه‌های پیشرفته، شاخه جدیدی در فیزیک سنگ بر مبنای مطالعه رقومی سنگ‌ها به وجود آمده است که فیزیک سنگ رقومی (Digital Rock Physics) نام دارد. فیزیک سنگ رقومی رویکردی بر مبنای مطالعه غیرمخرب نمونه‌های سنگی است که با استفاده از آن می‌توان خواصی مانند تراوایی را با صرف وقت و هزینه کمتر مورد ارزیابی و اندازه‌گیری قرار داد.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در راستای محاسبه تراوایی محیط متخلخل با حل معادلات جریان سیال به‌صورت عددی و همچنین با استفاده از تصاویر توموگرافی پرتو ایکس انجام شده است. معادلات ناویر-استوکس بر جریان سیال در محیط‌های متخلخل حاکم و شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم است (Bird et al., 2014; Roberson and Crowe, 1997). بعضی از این مطالعات عددی در نشان دادن محیط متخلخل از میکروساختارهای ساختگی استفاده کردند. در حالی که بعضی، از میکروساختار واقعی بدون در نظر گرفتن هیچ فرضی استفاده کردند. (Adler et al. (1990) و Martys et al. (1994) یک محیط مصنوعی ایزوتروپ ساختند و با این فرض که سیال نیوتونی با عدد رینولدز کم است، معادلات استوکس را برای آن حل کردند. (Martys et al. (2000) و Tashman et al. (2003) روش‌های نفاضل محدود در حل کامل معادلات ناویر-استوکس برای نمونه‌های میکروساختار

با استفاده از یک دستگاه اسپیرال تصویربرداری توموگرافی پرتو ایکس پزشکی CT scan-GE medical system- Bright speed ۱۶ با فاصله تصویربرداری ۶۰۰ میکرومتر و تفکیک پذیری ۲۰۰ میکرومتر تصویربرداری شدند. اطلاعات مربوط به تخلخل و تراوایی این پلاگ‌ها در جدول ۱ آورده شده است. مقادیر تخلخل مؤثر و تراوایی توسط آزمایش‌های RCAL در آزمایشگاه‌های مغزه، و مقادیر تخلخل کل در سال ۱۳۹۴ توسط ایزدی محاسبه شده است (ایزدی، ۱۳۹۴).

هندسه مش‌بندی شده دارد، مش‌بندی هندسه توسط الگوریتمی انجام و سپس مدل‌سازی جریان سیال بر روی هندسه فضای خالی انجام شد. در پایان، پس از اعمال گرادیان فشار مناسب و به دست آوردن دبی جریان، تراوایی سنگ از رابطه داریسی به دست آمد.

## ۲- پایگاه داده‌های مقاله

به منظور تهیه ساختار سه‌بعدی RVE و تعیین تراوایی پلاگ‌های سنگی، این پلاگ‌ها

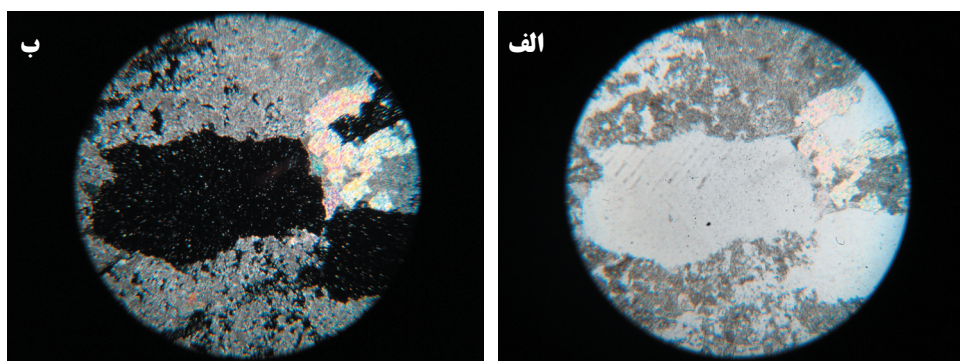
جدول ۱- اطلاعات مربوط به تخلخل و تراوایی پلاگ‌های استفاده شده در این پژوهش.

شماره پلاگ	ژرفا (متر)	تخلخل کل (%)	تخلخل مؤثر (%)	تراوایی (میلی داریسی)
۱	۲۷۰۸/۹	۲۳/۵۲	۲۲/۷۱	۶۰/۱۳
۲	۲۷۱۸/۳۳	۲۱/۰۱	۱۹/۰۵۴	۳۲/۰۵۴
۳	۲۹۸۰/۶۹	۲۳/۴۵	۲۲/۷۵	۵/۶۹۶
۴	۲۹۸۴/۱	۲۶/۹۸	۲۱/۷۰۷	۴/۰۴۳
۵	۲۹۸۴/۱۶	۲۹/۶۹	۲۹/۱	۷/۳۷۶
۶	۳۰۲۰/۷۲	۲۷/۸۶	۲۶/۲۲۲	۷۵/۶۱۸
۷	۳۰۲۳/۵۱	۲۱/۳۶	۲۳/۰۵۲	۷/۱۲۲
۸	۳۰۲۳/۶۹	۲۶/۰۳	۲۵/۲۹۲	۹/۸۶۱
۹	۳۰۲۸/۴۸	۲۶/۸۸	۲۰/۰۵۲	۱/۰۶۷
۱۰	۳۰۳۵/۵۷	۲۷/۵۱	۲۷/۱۵۲	۵/۰۴۴

## ۳- زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

دولومیتی شدن به وجود آمده است. تشکیل این دولومیت‌ها در مراحل آغازی دیاژنز (Early Diagenetic) صورت گرفته است. بعضی از فضاها خالی، همچنان خالی باقی مانده‌اند اما در بعضی از این فضاها خالی سیمانی از جنس کلسیت یا انیدریت بخشی یا تمام فضای خالی را اشغال کرده است (شکل ۱).

در این مقاله، ۱۰ نمونه از پلاگ‌ها و مقاطع نازک یکی از سازندهای مخزنی کربناته مربوط به مزوزویک در جنوب باختر ایران، مورد مطالعه قرار گرفت. در این نمونه‌ها در بین رمب‌های لوزی‌شکل (Rhomb) دولومیت، فضای خالی بین‌بلوری (Inter crystalline) وجود دارد که این تخلخل بین‌بلوری طی فرایند



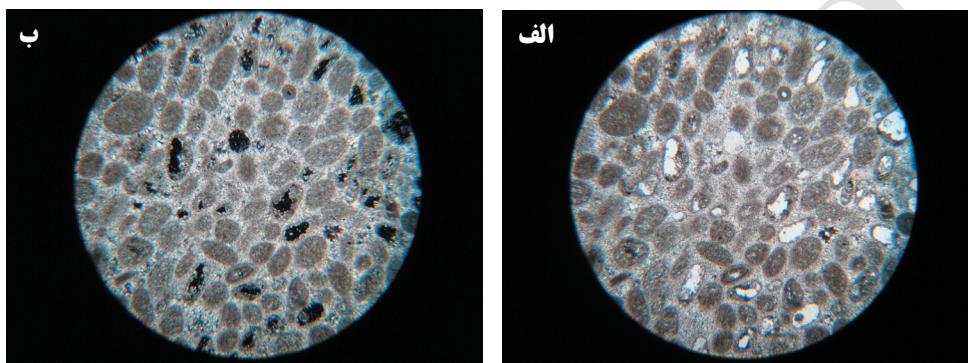
شکل ۱- تشکیل سیمان کلسیتی و انیدریتی در برخی از فضاها خالی؛ الف) تصویر در نور معمولی؛ ب) تصویر در نور قطبی.

مربوطه و پس از آن به معادلات جبری حاکم بر مسئله پرداخته می‌شود. مشکلی که وجود دارد این است که بر خلاف پدیده‌هایی که برای آنها معادلات ریاضی مناسبی ارائه شده‌اند (جریان آرام در هندسه‌های ساده)، پدیده‌هایی نیز وجود دارند که هنوز مدل ریاضی مناسبی برای آنها یافت نشده است (نظیر جریان در هندسه‌های پیچیده). در اینجا است که استفاده از روش‌های عددی به عنوان یک راه‌حل برای حل مسائل جریان سیال، جای خود را باز می‌کند. قدم اول در مدل‌سازی جریان سیال، تعیین ساختار سه‌بعدی فضای متخلخل به هم پیوسته است. این ساختار سه‌بعدی تهیه شده باید المان‌بندی شود. پس از ساخت مدل سه‌بعدی از فضای خالی، روابط حاکم بر جریان سیال در این مدل حل و مقادیر تراوایی محاسبه می‌شود (شکل ۳).

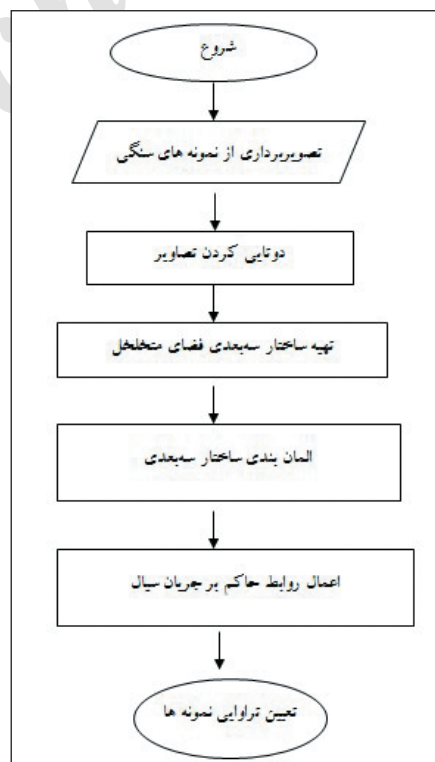
بافت سنگ‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه از ۳ بخش رسوبی گل کربناته، دانه‌های اسکلتی و ائولیت‌ها تشکیل شده است. برخی از دانه‌های اسکلتی و ائولیت‌ها که از جنس آراگونیت بوده‌اند، به دلیل انحلال‌پذیری زیاد، طی مراحل دیانزنی در آب‌های سازندی حل و تبدیل به تخلخل قالبی (Moldic Porosity) شده‌اند (سحابی، ۱۳۸۷). بخشی از فضای خالی به وجود آمده با مواد ریزدانه رسوبی اعم از گل کربناته یا ریزدانه‌های اسکلتی پر شده است و بخشی دیگر از فضاهای خالی همچنان خالی باقی مانده‌اند (شکل ۲).

#### ۴- روش پژوهش

در روش‌های تنوری، ابتدا با مشاهده پدیده فیزیکی، به بیان معادلات دیفرانسیل



شکل ۲- مقطع نازک یکی از پلاگ‌های سنگی. بافت زیست تخریبی در سنگ مخزن کربناته. فضاهای خالی قالبی که به صورت جدا از هم بوده و نقش کمی در جریان سیال دارند؛ الف: در نور معمولی؛ ب: در نور قطبی.



شکل ۳- فلوچارت مراحل تعیین تراوایی نمونه‌های سنگی.

## ۵- روابط حاکم

در شبیه‌سازی‌های جریان سیال معادلات ناویر-استوکس حل می‌شود (رابطه ۱). معادلات ناویر-استوکس، شرایط بقای مومنتوم را بر سیال نیوتونی اعمال می‌کند که تعادلی بین نیروهای داخلی، ویسکوز و فشار است (White, 1999).

$$\rho \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right] = \nabla P + \mu \nabla^2 V \quad (1)$$

که در آن  $V$  سرعت،  $P$  فشار و  $\mu$  گرانیوی (ویسکوزیته) دینامیک سیال است. می‌توان با حل معادلات ناویر-استوکس در برقراری جریان سیال در نمونه سنگ، مقادیر دبی و سرعت در نمونه را به دست آورد. مادامی که گرادیان فضایی در پتانسیل هیدرولیک وجود داشته باشد، سیال در سنگ جریان می‌یابد. رابطه بین گرادیان فشار و نرخ جریان با قانون دارسی بیان می‌شود (Tiab and Donaldson, 2015). تراوایی شاخصه‌ای است که در رابطه دارسی، گرادیان فشار را به دبی مرتبط می‌کند (رابطه ۲).

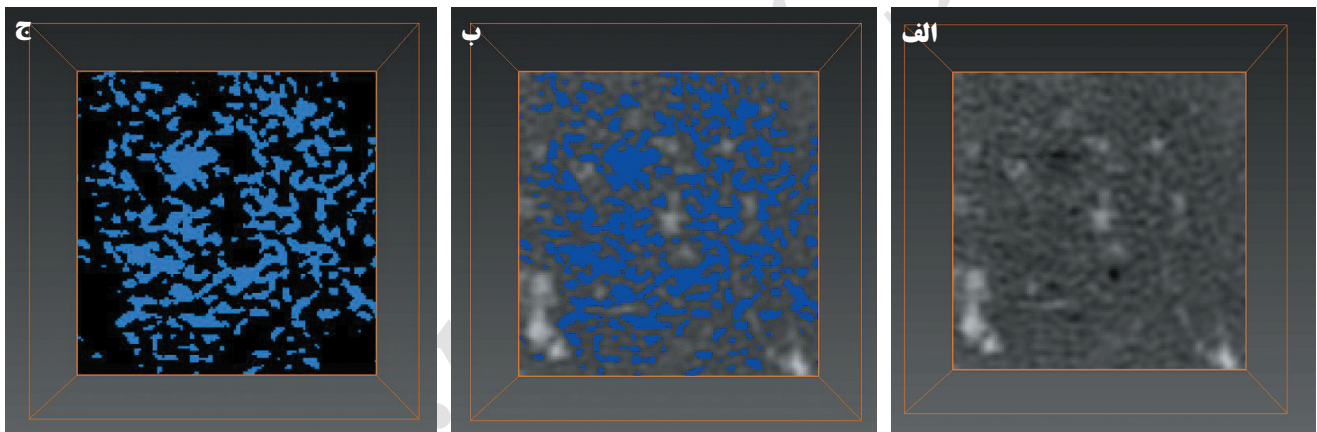
$$Q = \frac{k A \Delta P}{\mu dx} \quad (2)$$

که در آن  $Q$  دبی حجمی (Volumetric flow rate)،  $A$  سطح نرمال بر جریان،  $\mu$  ویسکوزیته سیال شناور،  $dp/dx$  گرادیان فشاری و  $k$  تراوایی است. بنابراین برای تعیین تراوایی، باید هندسه سه‌بعدی پلاگ‌ها ساخته شود.

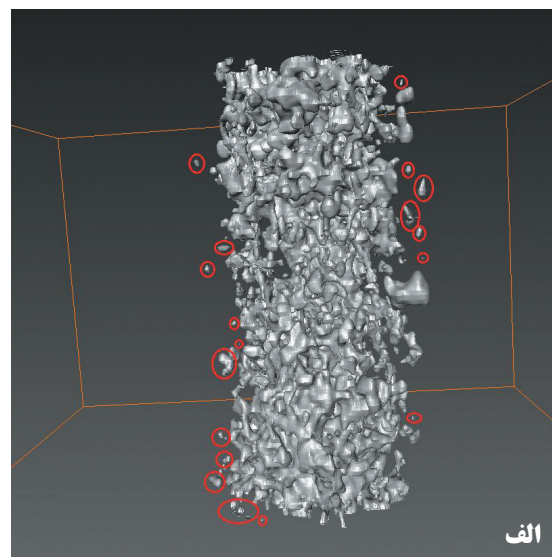
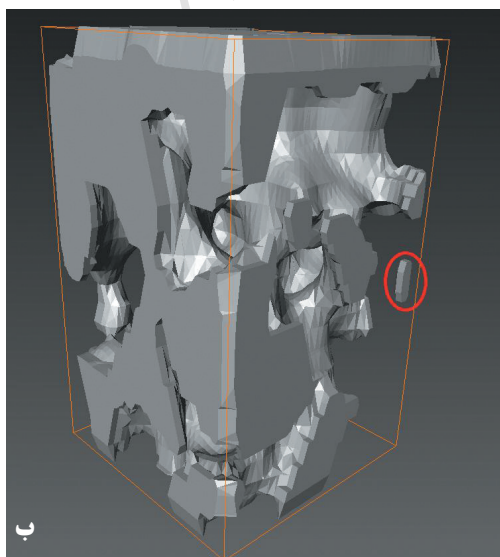
## ۶- ساخت مدل سه‌بعدی پلاگ‌ها

به منظور مدل‌سازی جریان سیال، ساختار سه‌بعدی فضای خالی شد. تصاویر گرفته شده با دستگاه توموگرافی پرتو ایکس، شامل مقطع‌های دوبعدی است که با ترکیب کردن آنها با یکدیگر، تصویر سه‌بعدی به دست می‌آید. با وجود روش‌های متعدد برای تعیین حد آستانه، تعیین این عدد کاری دشوار است. اگر بازه‌ای که برای حد آستانه در نظر گرفته می‌شود بزرگ باشد، نتایج تراوایی بسیار بیشتر از مقدار اصلی تراوایی به دست می‌آید. همچنین در حالتی که مقدار حد آستانه بسیار کوچک در نظر گرفته شود، مقدار تراوایی خیلی کمتر از مقدار اصلی به دست می‌آید. ایزدی (۱۳۹۴) مقادیر حد آستانه پلاگ‌های سنگی را تعیین کرد. با اعمال مقادیر حد آستانه بر تصاویر خاکستری رنگ حاصل از توموگرافی، تصاویر دوتایی (Binary) حاصل می‌شود (شکل ۴).

بعد از دوتایی کردن تصاویر، هندسه سه‌بعدی فضای خالی تهیه شد. بر اساس مشاهدات انجام شده در این پژوهش حجم فضای متخلخل با مقدار حافظه کامپیوتری مورد نیاز برای تولید متناسب است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، بخشی از فضای متخلخل با مرزها در تماس نیستند که به آنها فضای متخلخل جدا شده (Isolated Pores) گفته می‌شود. به منظور کاهش حافظه مورد نیاز برای مدل‌سازی‌های سه‌بعدی، می‌توان این فضاهای خالی را حذف کرد. زیرا تنها تخلخل مؤثر، در جریان سیال مؤثر است.



شکل ۴- الف) تصویر ۸ بیتی با مقیاس خاکستری؛ ب) اعمال مقادیر حد آستانه بر تصویر، رنگ آبی نشان‌دهنده فضای خالی است؛ ج) تصویر دوتایی شده. هر سه تصویر در مقیاس ۴۰ در ۴۰ پیکسل هستند.



شکل ۵- اتصال فضاهای خالی؛ الف) در مقیاس ۲۰۰ در ۲۰۰ در ۹۷ و کسل؛ ب) در مقیاس ۴۰ در ۴۰ در ۲۰ و کسل.

## ۷- مش بندی هندسه

$$1) P = 1 \text{ Pa/voxel} \quad (3)$$

$$2) \eta \left[ \nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T \right] \bar{n} = 0$$

$$1) P = 0 \quad (4)$$

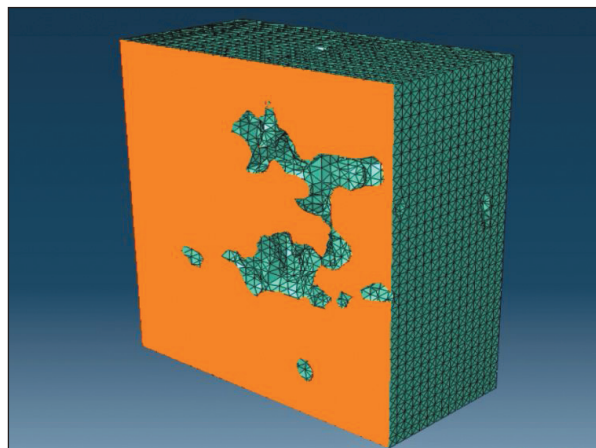
$$2) \eta \left[ \nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T \right] \bar{n} = 0$$

$$\bar{u} = 0 \quad (5)$$

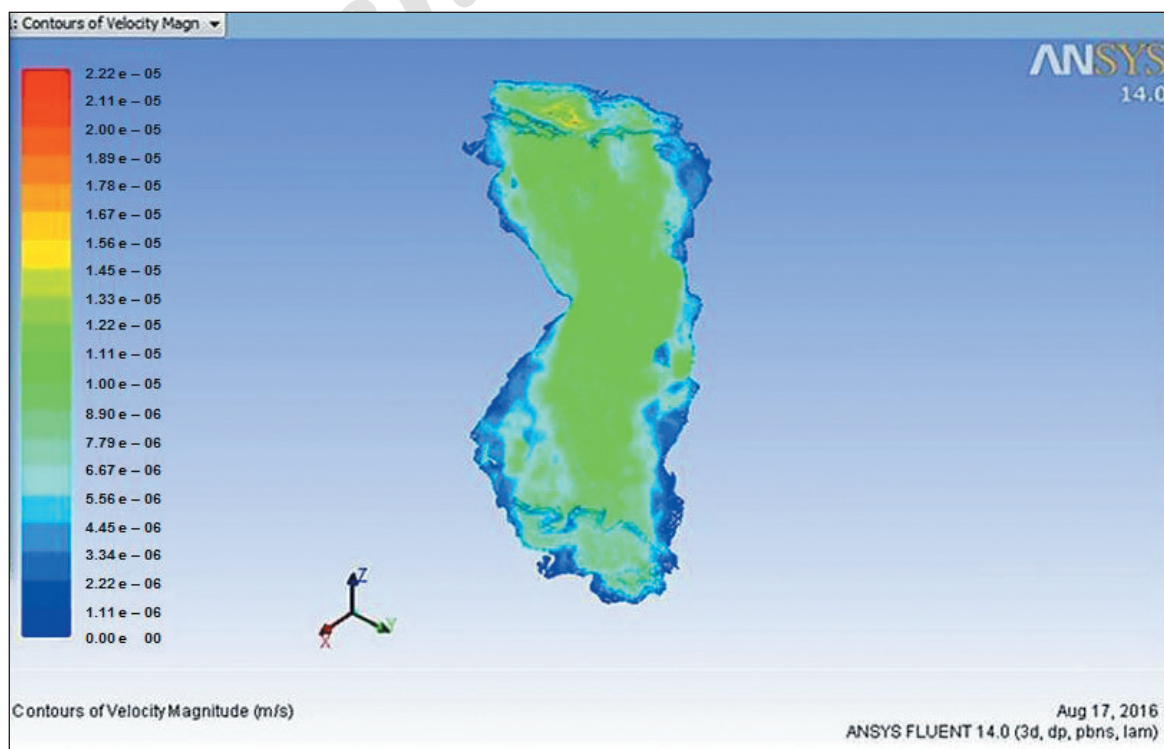
با اعمال شرایط فوق به مدل هندسه فضای متخلخل، جریان سیال در این هندسه برقرار می‌شود. بعد از اتمام حل معادلات ناویر-استوکس در هندسه، مدل‌سازی به انتها می‌رسد. در شکل‌های ۷ و ۸ نمونه‌ای از مدل ایجاد شده، با مقیاس‌های سرعت و فشار سیال در هندسه سه بعدی ارائه شده است.

به منظور مدل‌سازی جریان سیال، باید سطح داخلی نمونه‌ها نیز المان بندی شوند. با استفاده از الگوریتمی پیشرفته، فایل سطح مثلثی شده فضای خالی و سنگ (به عنوان محیط دوفازی) توسط المان‌های چهاروجهی (Tetrahedral elements) مش حجمی خورده شد (شکل ۶).

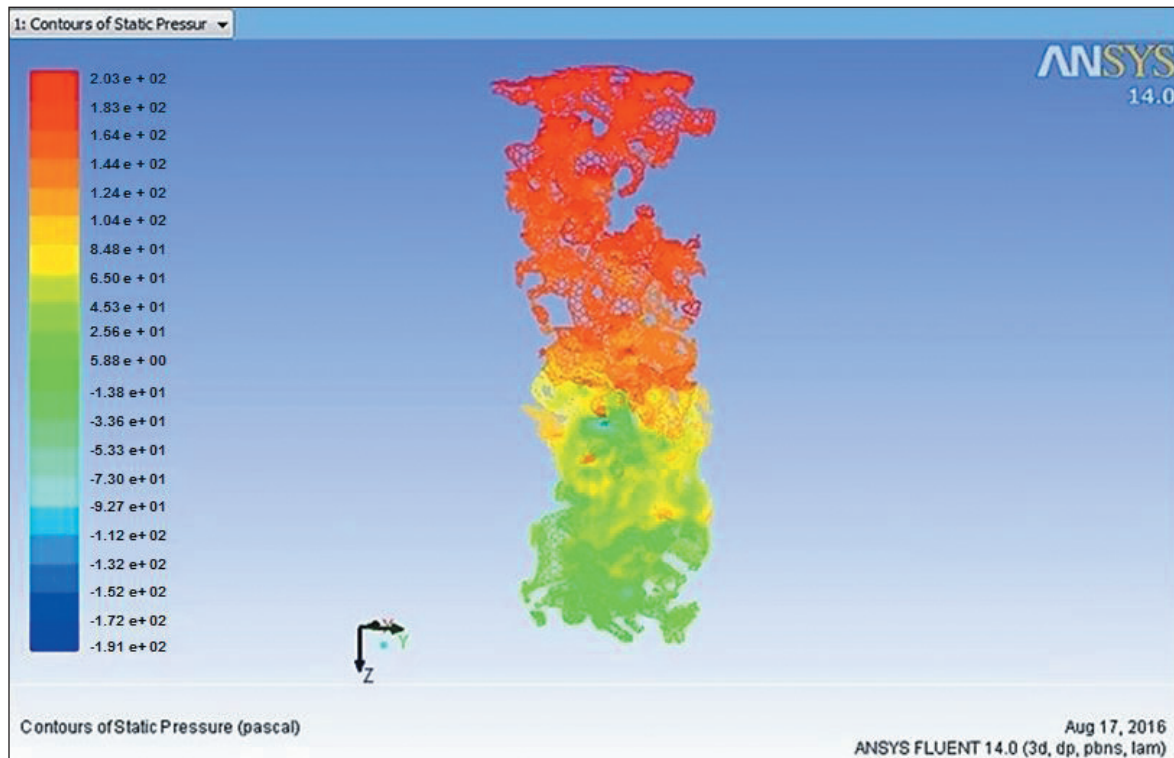
پس از مش بندی هندسه سه بعدی، باید سطوح ورودی (Inlet) و خروجی (Outlet) سیال و دیواره (Wall) های اطراف سیال که مرز بین فضای خالی و سنگ هستند، تعیین شوند. تعیین مقادیر مربوط به شرایط مرزی از مهم‌ترین مراحل مدل‌سازی است. شرایط مرزی ورودی سیال به صورت رابطه ۳ و شرایط مرزی خروجی سیال به صورت رابطه ۴ است (اولین معادله نشان دهنده فشار ورودی و خروجی و دومین معادله نشان دهنده صفر بودن تنش ویسکوز است). شرایط مرزی دیواره به صورت رابطه ۵ است (یعنی دیواره‌ها اصطکاک و سرعت ندارند):



شکل ۶- مش بندی نمونه به عنوان محیط دوفازی.



شکل ۷- توزیع سرعت سیال در یکی از نمونه‌های سنگی.

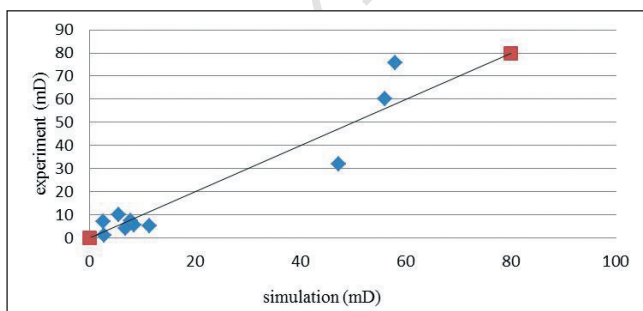


شکل ۸- توزیع فشار سیال در یکی از نمونه‌های سنگی.

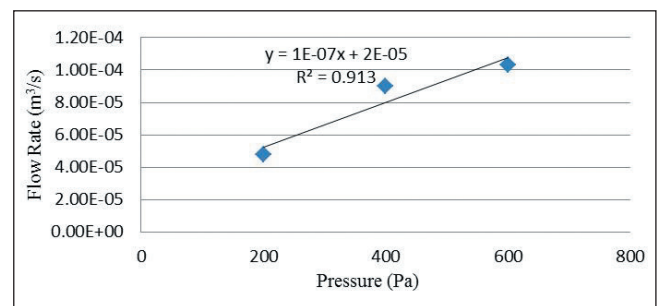
### ۸- ارزیابی تراوایی

به دست آمد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۱۰ نمودار داده‌های تراوایی آزمایشگاهی برحسب تراوایی به دست آمده با استفاده از حل معادلات جریان سیال در فضای متخلخل و خط با شیب ۴۵ درجه نیز روی این نمودار رسم شده است که میزان فاصله نقاط از این خط، مقدار خطا را نشان می‌دهد.

در صورتی که رابطه گرادیان فشار و دبی خطی باشد می‌توان از رابطه داری استفاده کرد (شکل ۹). به منظور تعیین تراوایی با استفاده از مدل‌سازی عددی، نمودار نرخ جریان حجمی برحسب گرادیان فشارهای اعمالی رسم می‌شود و با جای‌گذاری شیب نمودار در رابطه داری مقدار تراوایی به دست می‌آید. با استفاده از معادله داری (رابطه ۲) برای نمونه‌های مورد مطالعه، مقادیر تراوایی



شکل ۱۰- نمودار تراوایی اندازه‌گیری شده برحسب تراوایی تخمین زده شده.



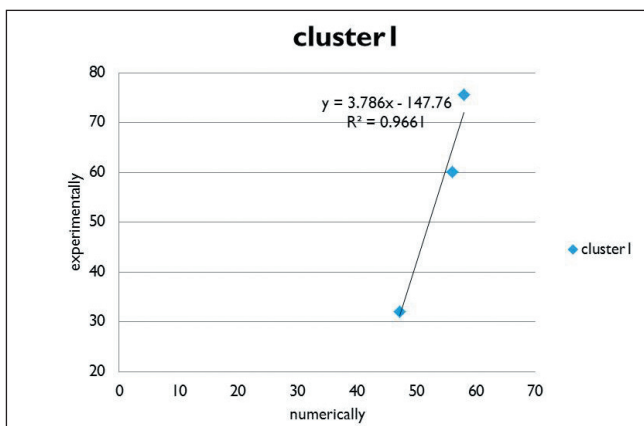
شکل ۹- بررسی خطی بودن رابطه دبی و فشار در یکی از نمونه‌ها؛ بین ۳ مقدار فشار اعمالی به نمونه و دبی مربوط به هر فشار.

جدول ۲- نتایج تراوایی محاسبه شده برای پلاگ‌ها.

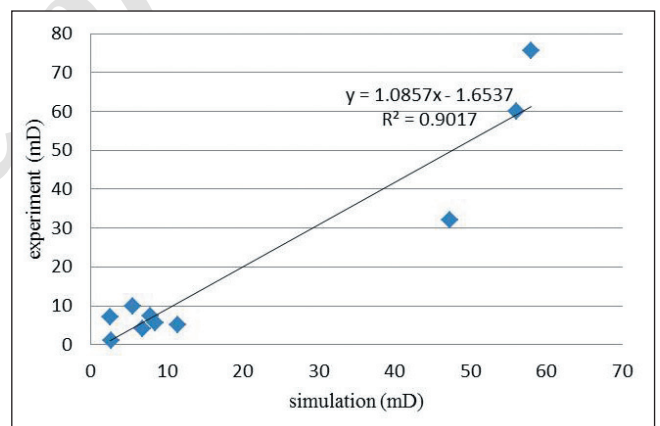
شماره پلاگ	ژرفا (متر)	تراوایی (میلی داریسی)
۱	۲۷۰۸/۹	۵۶/۰۷
۲	۲۷۱۸/۳۳	۴۷/۲۸
۳	۲۹۸۰/۶۹	۸/۵۱
۴	۲۹۸۴/۱	۶/۸۲۶
۵	۲۹۸۴/۱۶	۷/۸۵
۶	۳۰۲۰/۷۲	۵۸/۰۵
۷	۳۰۲۳/۵۱	۲/۵۷
۸	۳۰۲۳/۶۹	۵/۵۱
۹	۳۰۲۸/۴۸	۲/۷۲
۱۰	۳۰۳۵/۵۷	۱۱/۴۲

با داده‌های آزمایشگاهی دارند. با توجه به اینکه مقادیر تراوایی در دو طبقه قرار می‌گیرند، روند هر کدام از آنها به‌طور جداگانه رسم می‌شود (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).

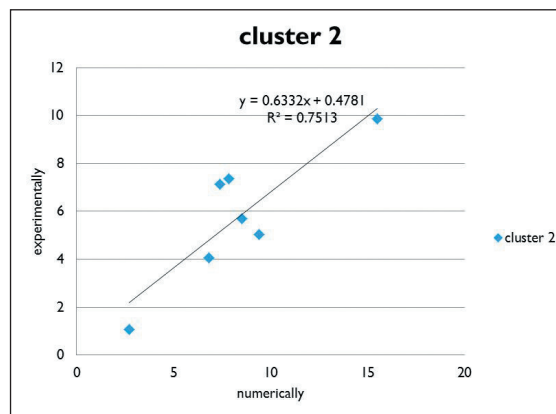
همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، بین داده‌های آزمایشگاه و مقادیر تخمین زده شده، روندی وجود دارد. داده‌های تراوایی محاسبه شده، همبستگی ۹۰ درصد



شکل ۱۲- نمودار تراوایی اندازه‌گیری شده بر حسب تراوایی تخمین زده شده برای تراوایی بیشتر از ۳۰ میلی داریسی.



شکل ۱۱- نمودار تراوایی اندازه‌گیری شده بر حسب تراوایی تخمین زده شده.



شکل ۱۳- نمودار تراوایی اندازه‌گیری شده بر حسب تراوایی تخمین زده شده برای تراوایی کمتر از ۳۰ میلی داریسی.

## ۹- نتیجه گیری

نمونه مورد بررسی در آزمایشگاه مربوط می‌شود. اندازه REVهای به دست آمده برای نمونه‌های بررسی شده در این پژوهش با اندازه پلاگ‌های مورد بررسی در آزمایشگاه تعیین تراوایی اختلاف چندانی ندارد. بنابراین این تفاوت مشاهده شده در مقادیر تراوایی مدل‌سازی شده، مربوط به پایین بودن بزرگنمایی تصاویر است. با مشاهده نمودار تراوایی شبیه‌سازی شده و تراوایی آزمایشگاهی بر حسب تخلخل می‌توان مشاهده کرد که این دو نمودار روند مشابهی دارند. نتایج نشان می‌دهد که زمانی که نتوان مقادیر دقیق تخلخل و تراوایی را به دست آورد، می‌توان روندی بین تخلخل و تراوایی به دست آورد. بنابراین با روش ارائه شده در این پژوهش می‌توان مقادیر تراوایی آزمایشگاهی را با استفاده از مدل‌سازی با تصاویر توموگرافی پرتو ایکس به دست آورد.

در هنگام بررسی و مطالعه میادین نفت و گاز، شناخت و پیش‌بینی رفتار مخزن، نیازمند اطلاعاتی درباره خواص سنگ و سیالات درون آن است. از آنجا که مغزه‌ها و پلاگ‌های تهیه شده از مخازن نفتی بسیار با اهمیت و حاوی اطلاعات ارزشمندی هستند، بنابراین استفاده از روش‌هایی که بتواند بدون تخریب مغزه یا پلاگ، اطلاعات آن را استخراج کند، بسیار مفید خواهد بود. در دهه اخیر استفاده از روش‌های تصویربرداری بدین منظور رایج شده است.

همان‌طور که نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهند، مقادیر تراوایی به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی تفاوت دارند. در تاریخچه تحقیق نیز این اختلاف وجود دارد که به بزرگنمایی تصاویر توموگرافی پرتو ایکس اولیه و اختلاف اندازه REV با اندازه

## کتابنگاری

ایزدی، ح.، ۱۳۹۴- تعیین مقدار تخلخل پلاگ‌های یکی از مخازن جنوب ایران با استفاده از تصویربرداری پزشکی، رویکردی مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری ماشین. دانشگاه تهران. سحابی، ف.، ۱۳۸۷- سنگ‌شناسی رسوبی. دانشگاه تهران.

## References

- Adler, P. M., Jacquin, C. G. and Quiblier, J. A., 1990- Flow in simulated porous media. *International Journal of Multiphase Flow*, 16(4), 691-712.
- Bird, M. B., Butler, S. L., Hawkes, C. D. and Kotzer, T., 2014- Computers and Geosciences Numerical modeling of fluid and electrical currents through geometries based on synchrotron X-ray tomographic images of reservoir rocks using Avizo and COMSOL. *Computers and Geosciences*, 73, 6-16. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.08.009>.
- Martys, N. S., Torquato, S. and Bentz, D. P., 1994- Universal scaling of fluid permeability for sphere packings. *Physical Review E*, 50(1), 403.
- Martys, N., Masad, E. and Muhunthan, B., 2000- Simulation of fluid flow and permeability in cohesionless soils. *Water Resources Research*, 36(4), 851-864.
- Pilotti, M., 2003- Viscous flow in three-dimensional reconstructed porous media. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27(8), 633-649.
- Ranut, P., Nobile, E. and Mancini, L., 2015- High resolution X-ray microtomography-based CFD simulation for the characterization of flow permeability and effective thermal conductivity of aluminum metal foams. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 67, 30-36.
- Roberson, J. A. and Crowe, C. T., 1997- *Engineering fluid dynamics*. Wiley, NY, USA.
- Tashman, L., Masad, E., Crowe, C. and Muhunthan, B., 2003- Simulation of fluid flow in granular microstructure using a non-staggered grid scheme. *Computers and Fluids*, 32(9), 1299-1323.
- Tiab, D. and Donaldson, E. C., 2015- *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Gulf professional publishing.
- Wang, L. B., Frost, J. D., Voyiadjis, G. Z. and Harman, T. P., 2003- Quantification of damage parameters using X-ray tomography images. *Mechanics of Materials*, 35(8), 777-790.
- White, F., 1999- *Fluid mechanics* WCB McGraw-Hill. Boston .
- Zhang, H., He, S., Jiao, C., Luan, G., Mo, S. and Guo, X., 2014- Determination of dynamic relative permeability in ultra-low permeability sandstones via x-ray ct technique. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 4(4), 443-455.



# Investigation of the carbonate rock permeability based on medical x-ray tomography images

F. Hormozzade<sup>1</sup>, M. Baniassadi<sup>2\*</sup>, F. Sahabi<sup>3</sup>, H. Izadi<sup>1</sup> and H. Memarian<sup>4</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., Department of Petroleum Exploration Engineering, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Petroleum Exploration Engineering, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Professor, Department of Petroleum Exploration Engineering, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2017 July 01

Accepted: 2018 January 27

## Abstract

The determination of Petrophysical rock properties has always been an important part of geological modeling and also is used in reservoir engineering studies. Permeability ( $k$ ) is one of the most important properties of porous media which is the measure of a porous material to allow fluids to pass through it. Permeability can be determined from both experimental tests and numerical simulations. Numerical simulations should be performed on geometries determined from advanced imaging techniques. Digital rock physics (DRP) is an approach for studying rocks nondestructively. In this paper, 10 carbonate rock plugs from the oil fields in South-West of Iran were imaged by medical CT scan and the outputs were used for image processing and permeability determination. We evaluated the use of Navier-Stokes equations to perform fluid flow simulation through the pore spaces geometry. The permeability of the samples were calculated and compared with laboratory-derived values. The results indicated a trend between the permeability values reported by the laboratory and medical CT images with  $R^2=90\%$ .

**Keywords:** Permeability, Digital Rock Physics, Fluid flow, X-Ray Tomography, Pore space geometry

For Persian Version see pages 193 to 200

\*Corresponding author: M. Baniassadi; E-mail: m.baniassadi@ut.ac.ir

Archive of SID